

Uso de un arreglo ortogonal para el análisis del proceso de electroerosión por penetración con electrodos de forma de grafito y cobre sobre microfundición de aluminio

(Use of an orthogonal arrangement for the analysis of the process of die sink electrical discharge machining with shape electrodes of graphite and copper on aluminum micro-casting)

Cristian F. Pérez Salinas¹, Edwin Moya¹, Diana Coello¹

Resumen:

Este trabajo trata sobre el uso del método *Taguchi* en la realización de experimentos para analizar las respuestas múltiples en el proceso de mecanizado por electroerosión por penetración (EDM) mediante electrodos de cobre y grafito. Este proceso de manufactura se realizó sobre el material microfundición de aluminio ampliamente utilizado en la industria de fabricación de moldes de calzado. La experimentación se llevó a cabo según un arreglo ortogonal L₈. Se utilizó análisis de varianza (ANOVA) para determinar los efectos de las variables de entrada (el material del herramental, el tiempo de pulso, la forma de la herramienta y la profundidad de corte) sobre las variables de salida (la tasa de remoción del material y la rugosidad superficial); así como también un análisis de regresión para predecir los resultados del análisis experimental. Los resultados han demostrado que se pueden optimizar los parámetros de mecanizado con análisis de las respuestas múltiples efectivamente. Se evidencia que, el tiempo de pulso es el principal actor en la tasa de remoción del material (MRR) y el tiempo de mecanizado predomina sobre la rugosidad superficial (Ra). Finalmente, se demostró que el electrodo de cobre tiene mejor eficiencia de trabajo y el grafito deja una mejor rugosidad superficial.

Palabras clave: arreglo ortogonal; electroerosión; electrodo; rugosidad; desgaste herramental.

Abstract:

This paper deals with the use of the Taguchi method in the realization of experiments to solve the multiple answers in the process of EDM machining using copper and graphite electrodes. This manufacturing process was carried out on the aluminum microfusion material widely used in the footwear manufacturing industry. The experimentation was carried out according to an orthogonal arrangement L₈. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the effects of the input variables (tooling material, pulse time, tool shape and cutting depth) on the output variables (material removal rate and surface roughness); as well as a regression analysis to predict the results of the experimental analysis. The results have shown that machining parameters can be optimized with considerations of multiple responses effectively. It is evident that the pulse time is the main influencer in the material removal rate (MRR) and the machining time has a greater influence on the surface roughness (Ra). Finally, it was demonstrated that the copper electrode has better working efficiency and the graphite gives better surface roughness.

Keywords: orthogonal arrangement; electroerosion; electrode; roughness; tooling wear.

¹ Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador (cf.perez@uta.edu.ec, edwinrmm199198@gmail.com, d.coellofiallos@fis.unical.it).

1. Introducción

El mecanizado por electroerosión (EDM) es uno de los procesos de mecanizado no convencionales más utilizados en la industria de la conformación plástica e inyección de materiales por fundición. Este mecanizado es capaz de manufacturar piezas eléctricamente conductoras o parcialmente conductoras de formas complejas independientemente de su dureza debido a que su ventaja distintiva se basa en la eliminación de material sin contacto (Kunieda, Lauwers, Rajurkar, & Schumacher, 2005). El proceso se fundamenta en la eliminación de material por efectos térmicos de fusión y evaporación mediante descargas eléctricas de alta temperatura bajo un baño de un líquido dieléctrico. El calor generado por el proceso es disipado por la herramienta, la pieza de trabajo y el líquido dieléctrico; este último también realiza las veces de limpiador superficial de residuos de material de la herramienta y material producto de las microdescargas.

Se ha observado que hay muchas variables del proceso EDM que afectan el acabado superficial de los elementos manufacturados. En publicaciones anteriores (Banker, Prajapati, Prajapati & Modi, 2014; Roy & Dutta, 2014; Singh, Kasdekar, & Parashar, 2015; Sohani, Gaitonde, Siddeswarappa & Deshpande, 2009) se ha informado que las variables más importantes son: el nivel de intensidad, la duración del impulso de corriente, el voltaje, la polaridad del electrodo, las propiedades térmicas de la herramienta del material trabajado, el dieléctrico y la forma del herramental. Para la práctica del mejoramiento de la electroerosión, variables como la tasa de eliminación de material (MRR), la tasa de desgaste de la herramienta (TWR), y la calidad de la superficie (SR) han sido muy utilizadas para optimizar y satisfacer los requerimientos de la industria (Wu et al., 2016; Yahya & Manning, 2004).

El desgaste que se produce en los electrodos en el proceso de electroerosión incide en la precisión geométrica de las piezas de trabajo (Shrivastava & Sarathe, 2014). Autores como (Lee, Lim, Narayanan & Venkatesh, 1983) reportan que la calidad superficial es afectada por el tiempo de pulso y la intensidad de corriente, mientras cuantifican el daño sobre superficies electroerosionadas de diferentes aceros de herramientas. Además, varios estudios han obtenido modelos para valorar el desgaste de las herramientas, la tasa de remoción de material y la rugosidad superficial, en función de la duración de pulso, la intensidad de corriente, entre otros factores (Amorim, Weingaertner, & Bassani, 2010; Pandey & Jilani, 1987).

En este contexto, la tecnología EDM ha avanzado como un proceso importante en la fabricación de moldes de productos de alta precisión; por lo tanto, la búsqueda de mejores parámetros para los logros en la industria de la fabricación ha sido la preocupación y el interés de varias investigaciones. Estudios realizados por (Lin, Lin, & Ko, 2002; Marafona & Wykes, 2000; Su, Kao, & Tarng, 2004) emplean análisis estadísticos mediante arreglos ortogonales, lógica difusa y análisis avanzados como redes neuronales para la optimización del proceso de electroerosión. No cabe duda que los diseños experimentales como método de Taguchi son de gran ayuda a la experimentación técnica (Cuenca, Paredes, & Córdor, 2016; Mitra, Jawarkar, Soni, & Kiranchand, 2016; Montgomery, 2017).

En la práctica, la intención del proceso EDM es lograr una alta tasa de eliminación de material, más un pequeño desgaste del electrodo con una baja rugosidad superficial; por lo mismo, en este trabajo, se realizó una secuencia de experimentos con el objetivo de proporcionar directrices útiles para optimizar el EDM analizando el desgaste y la rugosidad superficial bajo los efectos del tipo de material de la herramienta, su geometría, tiempo de ciclo y la profundidad de corte.

2. Materiales y Metodología

2.1. Proceso de electroerosión

La experimentación del proceso de electroerosión por penetración se efectuó en condiciones de mecanizado sumergido “Diesinking-EMD” en dieléctrico diésel mediante una máquina EMD marca Chevalier modelo DM-540 con control Bipulsos CC una fuente de poder de 75 amperios. El tanque de almacenamiento dieléctrico es de 1200x700x500 mm y un desplazamiento lineal tridimensional de: X-500, Y-400, Z-200 mm respectivamente. El montaje experimental para las pruebas de electroerosión se muestra en la *Figura 1*. La pieza de trabajo utilizado fue un bloque de microfundición de aluminio de 75x75x12 mm. La composición química de la microfundición de aluminio se presenta en la *Tabla 1*, obtenida por prueba de espectrometría. Las propiedades físicas y mecánicas se detallan en la *Tabla 2*.



Figura 1. Esquema del proceso experimental; a) Máquina EDM, b) Electrodo de forma

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
Min	0.41		0.14		0.8	0.04				
Max	0.79	0.70	0.39	0.15	1.21	0.35	0.22	0.15	0.15	Resto

Tabla 2. Propiedades físicas de la microfundición de aluminio (Santamaría Zambrano, 2017)

Propiedad	Valor	Propiedad física	Observaciones
Densidad [gr/cm ³]	2.7	Coefficiente de dilatación (0 a 100 °C) [°C ⁻¹ x10 ⁶]	23.6
Rango de fusión [°C]	575-650	Conductividad Térmica (0 a 100 °C) [W/m°C]	Temple T6: 167
Módulo de elasticidad [Mpa]	69500	Resistividad a 20 °C [uΩcm]	Temple T6: 4.0
Coefficiente de Poisson	0.33	Calor específico (0 a 100 °C)	940

Para los ensayos de electroerosión se empleó un diseño experimental de cuatro factores (un categórico y tres numéricos) a dos niveles cada uno como se muestra en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Diseño experimental: factores de electroerosión y niveles

Factores	Niveles	
Tipo herramienta	grafito	cobre
Geometría de herramientas	cuadrado	circular
Tiempo de ciclo, (ms)	6	12
Tiempo de ensayo (min)	5	8

2.2. Herramientas

Para la experimentación se utilizó cobre y grafito, dos materiales eléctricamente conductores para emplearlos como electrodos; se adquirió cada uno de los materiales de formas circular y cuadrada y con una longitud suficiente para la realización del experimento (*Tabla 3*). Otro aspecto de importancia para los electrodos utilizados en EDM es el bajo desgaste de los mismos durante la operación, es decir los materiales de los electrodos deben tener alto punto de fusión (Sanghani & Acharya, 2014). Las propiedades de los electrodos de cobre y grafito se muestran en la *Tabla 4*. Las dimensiones de los electrodos redondos de ambos materiales se establecieron en 2 pulgadas de largo y $\frac{3}{4}$ de diámetro, mientras que para la geometría cuadrada también el largo se mantuvo en 2 pulgadas y cada lado del cuadrado en $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Tabla 4. Propiedades físicas de los electrodos de cobre y grafito (Santamaría Zambrano, 2017)

Material	Grafito	Cobre
Composición %	100	99.9
Densidad (g/cm ³)	1.811	8.96
Punto de fusión °C	3675	1084
Resistividad eléctrica (μΩ*cm)	14	9
Dureza	HB 10	BH 100

2.3. Medición de la rugosidad (Ra) y la tasa de remoción de material (MRR)

La rugosidad media (Ra) se midió con un rugosímetro marca MITUTOYO modelo SJ 210, calibrado bajo la norma ISO 1997 con longitud de corte $\lambda_c = 0.8\text{mm}$ y radio $\lambda_s = 2.5\text{mm}$. Se realizaron 4 medidas en cada probeta para minimizar el error y luego se promedió para obtener el Ra correspondiente a cada ensayo. Los resultados de las mediciones se muestran en la *Tabla 5*.

El MRR se define como la proporción del cambio en la pieza de trabajo del peso inicial menos el peso obtenido luego del proceso de EDM, dividido para el tiempo de duración del ensayo, y se calcula mediante la Ecuación 1.

$$MRR = \frac{W_{bm} - W_{am}}{t} \quad (1)$$

Donde:

W_{bm} = Peso de la pieza antes del mecanizado por EDM (g), W_{am} = Peso de la pieza después del mecanizado por EDM (g) y t = Tiempo de duración de cada ensayo (min).

2.4. Análisis experimental

El objetivo fue la optimización del mecanizado por EDM, por lo cual el método de Taguchi se perfiló como la mejor opción, ya que es uno de los métodos más efectivos en la determinación de los parámetros de control óptimos de mecanizado que brindan las mejores cualidades sobre las variables de respuesta, mismas que para el presente estudio fueron: la rugosidad media (Ra) y la tasa de remoción de material (MRR). Taguchi se basa en el empleo de matrices o arreglos ortogonales que constituyen técnicas estadísticas que sirven para estimar y cuantificar el efecto de las variables de control tanto en respuesta media como en desviación. Otro aspecto positivo es que Taguchi reduce el número de ensayos requeridos para la experimentación mediante la prueba en pares de combinaciones y es más conciso y eficiente que otros métodos estadísticos pues ahorra recursos y tiempo al investigador. La selección de las condiciones de análisis como “el menor es mejor” y “el mayor es mejor” se muestra en la *Ecuación 2* y en la *Ecuación 3* respectivamente.

$$S / N = -10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\sum (y^2)}{n} \right] \quad (2)$$

$$S / N = -10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\sum \left(\frac{1}{y^2} \right)}{n} \right] \quad (3)$$

Los datos de la experimentación son transformados en datos señal-ruido (SN). Para cada factor de control se obtiene el S/N más crítico.

2.5. Evaluación de topografía superficial

Para el análisis topográfico tanto de la herramienta como el material trabajado, se utilizó la técnica de microscopía de barrido SEM de marca VEGA 3 TESCAN.

3. Resultados y Discusión

3.1. Análisis experimental

La *Tabla 5* presenta los resultados experimentales para la rugosidad superficial (R_a) y desgaste de las herramientas mediante el método de Taguchi. Para el caso del MRR se empleó la *Ecuación 3*, ya que el objetivo es la mayor remoción de material en menor tiempo posible; por el contrario, la rugosidad media (R_a) mientras sea menor quiere decir que el acabado superficial es mejor, por lo cual se ocupó para este caso la consideración “menor es mejor” de la *Ecuación 2*.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Tabla 5. Resultados experimentales y valores de S/N para variable de salida

Experimento N°	Factores de control				R_a (μm)	S/N para R_a (dB)	G (g/min)	S/N para G (dB)
	Material	Geometría	Pulso (ms)	Profundidad (mm)				
1	Cobre	Cuadrado	3	5	0,0800	21,938	5,369	-14,597
2	Cobre	Cuadrado	6	8	0,0375	28,519	5,893	-15,407
3	Cobre	Circular	3	8	0,0400	27,959	5,639	-15,023
4	Cobre	Circular	6	5	0,0125	38,062	5,886	-15,396
5	Grafito	Cuadrado	3	8	0,0200	33,979	5,505	-14,814
6	Grafito	Cuadrado	6	5	0,0375	28,519	5,133	-14,207
7	Grafito	Circular	3	5	0,0200	33,979	3,601	-11,127
8	Grafito	Circular	6	8	0,0500	26,021	7,105	-17,031

Como se observa en la *Tabla 6*, los parámetros de control óptimos S/N para MRR, se establece el material del electrodo en el nivel 1 correspondiente al material cobre, en cuanto a la geometría de los electrodos el mejor es el nivel 1, lo que significa que la geometría cuadrada es mejor que la geometría circular, en lo correspondiente a la duración del pulso nuevamente el nivel 1 vuelve a ser el mejor, entonces se tiene que con 3 segundos de pulso existe mayor tasa de remoción de material que con pulso de 6 segundos. Finalmente, para el tiempo de duración del ensayo a nivel 1 repite en ser el

mejor, con el tiempo de ensayo de 5 minutos se demostró mayor eficiencia que al ensayar con 8 minutos. Los resultados numéricos se los puede visualizar en la *Figura 2*.

Tabla 6. Valores de respuesta S/N de los factores de control sobre Ra y MRR

Nivel	Tasa de remoción de material (MRR)				Rugosidad media (Ra)			
	Material	Geometría	Pulso	T. Ensayo	Material	Geometría	Pulso	T. Ensayo
1	-29,120	-28,240	-27,610	-29,460	-15,110	-14,760	-14,540	-13,890
2	-30,620	-31,510	-32,130	-30,280	-14,290	-14,650	-14,840	-15,510
Delta	1,510	3,270	4,520	0,820	0,810	0,110	0.32	1,620

La *Figura 2* y la *Figura 3* muestran gráficamente el comportamiento de cada parámetro de control y su efecto particular en proceso de electroerosión, sea que se trabaje con electrodo de cobre o grafito.

Entre los parámetros de control óptimos S/N para Ra se encontró que el material en el nivel 2 es más eficiente, con lo cual se interpreta que el material grafito provee mejor rugosidad que el material cobre. En lo referente a la geometría, el nivel 2 es mejor; es decir que, la geometría circular es mejor que la geometría cuadrada en Ra. El tiempo de pulso, al igual que en el caso de MRR, es más eficiente en el nivel 1. El tiempo de ensayo también se ubica en el nivel 1 como el nivel óptimo, con lo cual se tiene que nuevamente electroerosionar 5 minutos resulta ser más eficiente que 8 minutos. Para corroborar los resultados se tiene la *Figura 3*, donde se puede visualizar lo manifestado.

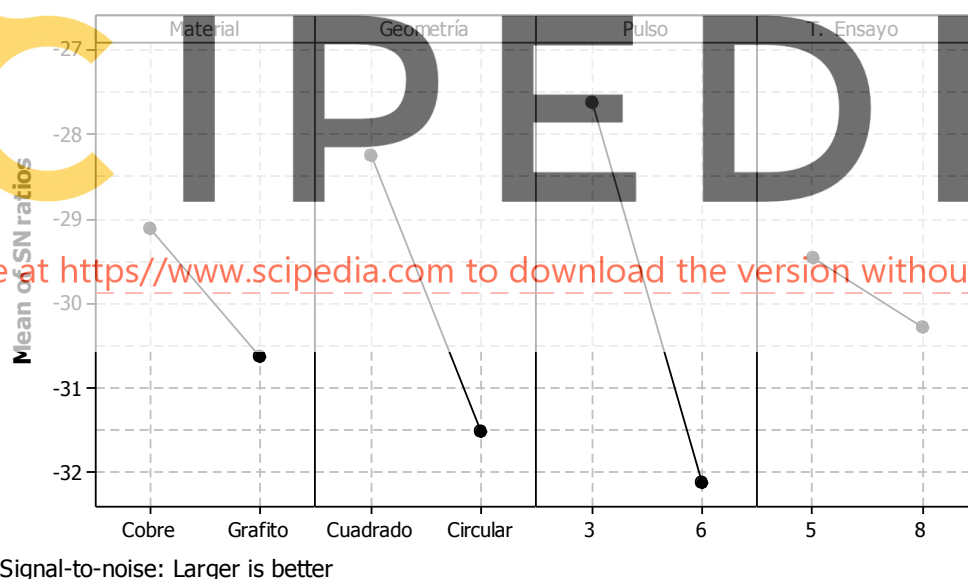
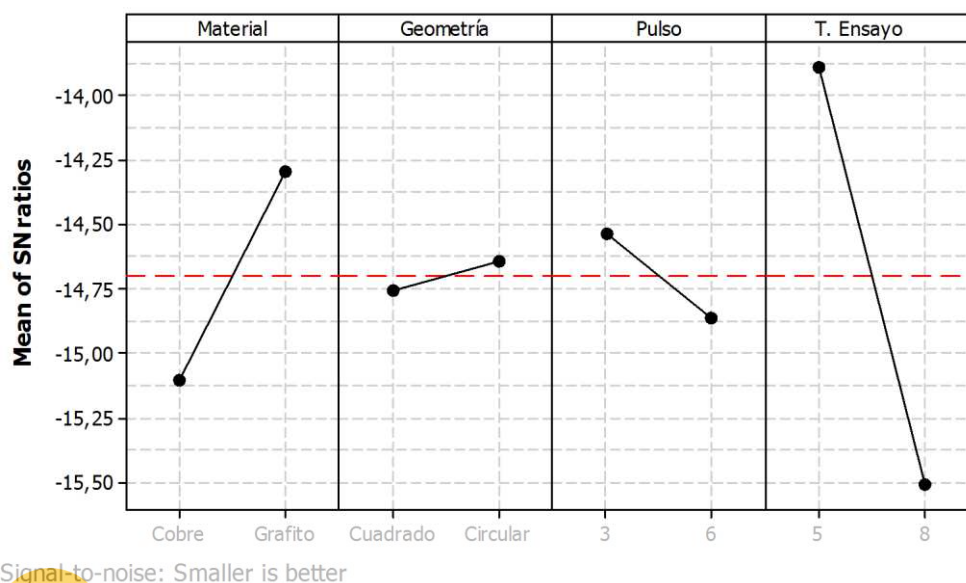


Figura 2. Efecto de los parámetros sobre la media S/N para MRR

3.2. Análisis ANOVA

El análisis de varianza ANOVA es una técnica estadística muy útil para revelar el nivel de significancia de cada factor de control respecto a las variables de salida. Separa individualmente el efecto de estas, incluso del error para poder determinar cuales tienen mayor influencia para convertirse en el foco de atención para futuros ensayos.

De la *Tabla 7*, se puede extraer que para MRR el parámetro de control que presenta mayor influencia es el tiempo de pulso con el 23.42% de porcentaje de contribución. Luego la geometría del electrodo también tiene significancia con el 10.75%. El tercer factor a tener en cuenta es el tipo de material con el 7.04%, mientras que casi sin porcentaje de contribución 1.97% se encuentra el tiempo de duración del ensayo.



Signal-to-noise: Smaller is better

Figura 3. Efecto de los parámetros sobre la media S/N para Rugosidad

Tabla 7. ANOVA de los factores de control sobre Ra y MRR

Fuente de Variación (FV)	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	Estadístico F	Porcentaje de contribución %	Valor P
MRR						
Material	1	0,0002	0,0002	0,37	7,04	0,585
Geometría	1	0,0003	0,0003	0,57	10,75	0,506
Pulso	1	0,0008	0,0008	1,24	23,42	0,347
T. Ensayo	1	0,0001	0,0001	0,10	1,97	0,768
Error	3	0,0018	0,0006		56,81	
Total	7				100,00	
Ra						
Material	1	0,2600	0,2600	0,17	3,91	0,704
Geometría	1	0,0140	0,0140	0,01	0,21	0,93
Pulso	1	0,0050	0,0050	0,00	0,08	0,959
T. Ensayo	1	1,9040	1,9040	1,28	28,61	0,341
Error	3	4,4720	1,4910		67,20	
Total	7	6,6550			100,00	

Nótese que el porcentaje de contribución del error es elevado para MRR y Ra con 56.81% y 67.20% respectivamente. En lo referente a Ra, se obtiene que el tiempo de ensayo influye mayoritariamente por encima de los otros factores de control con 28.61% de porcentaje de contribución, luego con 3.91% el tipo de material del electrodo es el segundo factor de control de importancia y los otros dos factores tanto el tiempo de pulso y la geometría no tienen efecto estadístico sobre Ra.

Cuando la necesidad de proceso de desbaste a bajo amperaje se trate, se evidencia que el cobre con una geometría rectangular del electrodo se procesará eficientemente (T. Muthuramalingam & Mohan, 2013; T. Muthuramalingam & Mohan, 2015; Srinivasa & Eshwara, 2018; Tiwari, 2017). En contraste con (Ali et al., 2015; Kumar, Kumar, Tewatia, & Yadav, 2012), los resultados de (MMR) y (Ra) pueden cambiar al trabajar con altos amperajes, consecuentemente los rangos de trabajo de cada parámetro así como el tipo de material y dieléctrico son trascendentalmente importantes. Según los

resultados obtenidos, la geometría del electrodo es importante a la hora de remover el material, pero no es significativo a la hora de evaluar la rugosidad superficial. En aplicaciones reales, como por ejemplo la electroerosión de forma en moldes de plantas de calzado es una realidad común. Esta industria combina múltiples formas rectangulares y circulares constantemente; Por lo tanto, esto no tiene implicación significativa sobre (Ra).

A la hora de electroerosionar, el parámetro tiempo de ensayo se transforma en profundidad de corte. Es decir, cuanto más tiempo se mantiene la electroerosión mayor será la profundidad a la cual se esté mecanizando el material. Del análisis experimental y estadístico se puede precisar que la profundidad de corte en EDM no tiene mayor variación en la tasa de remoción de material (MRR) (*Figura 2 y Tabla 7*), pero sin duda que a mayor profundidad de corte MRR se reducirá ligeramente de forma proporcional. En cambio, al considerar la rugosidad superficial (Ra) la profundidad de corte tiene un impacto sustancial pero con un efecto inverso. Esto quiere decir que la rugosidad se va estabilizando de mayor a menor valor a medida que la profundidad de corte aumenta. Por lo tanto, el electrodo de cobre será una opción adecuada a la hora de mecanizados profundos y de larga duración de trabajo, concordando con estudios referentes (Ali et al., 2015; T. Muthuramalingam & Mohan, 2015).

3.3. Análisis de regresión

Las ecuaciones de regresión se utilizan para desarrollar fórmulas matemáticas que permitan predecir el comportamiento de los factores de control respecto a un factor de salida con el afán de a futuro predecir el comportamiento de una cualidad antes de iniciar el mecanizado. Se utilizaron las siguientes nomenclaturas para el desarrollo de las ecuaciones de regresión tanto lineal como cuadrática: material (M), geometría (G), pulso (P) y tiempo de ensayo (T).

Las ecuaciones obtenidas para MRR y Ra, se detallan en la Ecuación 4 y en la Ecuación 5 respectivamente, con un R-Sq = 58.0%, R-Sq(adj) = 16% y un R-Sq = 40.5%, R-Sq(adj) = 0,0% respectivamente.

$$MRR = 0.13439 - 0.01346(M) - 0.01596(G) - 0.007404(P) - 0.002821(T) \quad (4)$$

$$Ra = 3.479 - 0.04201(M) + 0.0234(G) - 0.0035(P) + 0.4120(T) \quad (5)$$

Las ecuaciones muestran una confiabilidad o nivel de ajuste de 58% y 40.6% para MRR y Ra respectivamente, esto tiene relación con el porcentaje de contribución del error elevado dado en el análisis ANOVA (*Tabla 7*). Los resultados permitieron generar ecuaciones lineales donde se observa que para MRR tuvo mayor ajuste que para RA, lo cual indica que es más fácil predecir el comportamiento de MRR que el de Ra.

3.4. Imágenes SEM sobre superficie de herramienta y material erosionado

Luego de los ensayos de electroerosión, se obtuvieron las siguientes imágenes SEM sobre la superficie de la herramienta de cobre. La estructura macro del electrodo desgastado después del ensayo de mecanización por electroerosión de penetración EDM se muestra en la *Figura 4*, donde se ve una doble imagen SEM de 40 aumentos con un nivel de energía de 20 KV. Las imágenes de la izquierda nos presentan la imagen SEM obtenida de electrones retrodispersos y las de la derecha imágenes obtenidas del detector de electrones secundarios.

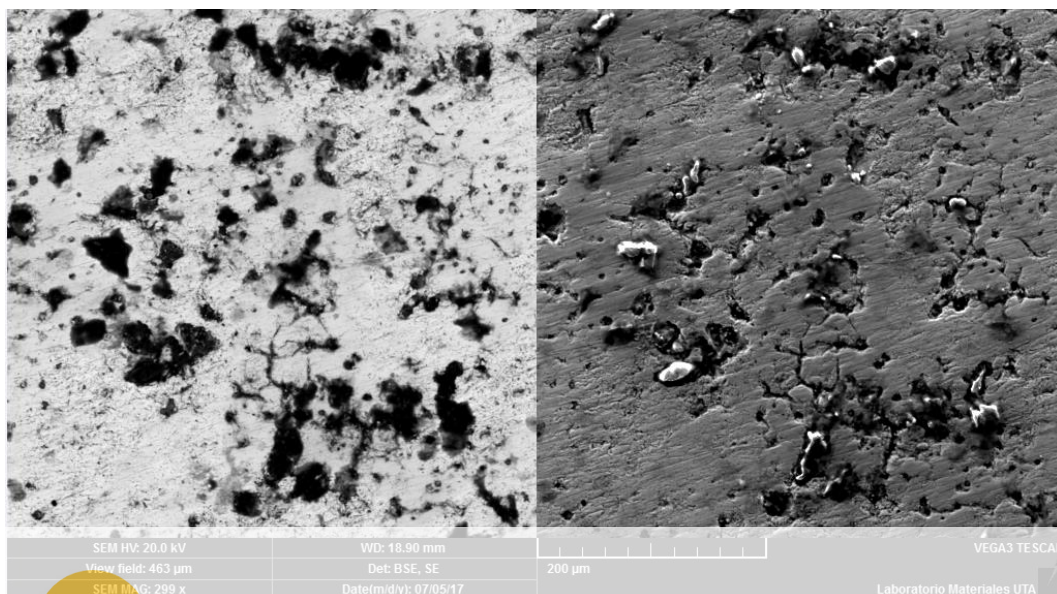


Figura 4. Residuos de mecanización de carburos impregnados sobre la superficie del electrodo de Cobre, imagen SEM BSE y SE

En la misma figura podemos observar la morfología de la superficie del electrodo de cobre luego de la mecanización de 6 mm de profundidad. En la imagen de electrodos dispersos se puede observar el contraste entre la zona de la matriz (Cobre en escala de grises en color claro) y las sombras de residuos de carburos residuales de la fusión de la electroerosión. El contraste se produce por la diferencia del número atómico entre el cobre y el carbono. También se evidencia una pequeña zona de la superficie del electrodo de cobre desgastado; donde se puede apreciar pequeñas inclusiones de partículas de aluminio (zonas grises) de nivel intermedio a parte de los residuos de carburos consecuencia del dieléctrico utilizado (Diesel).

Como se conoce que las descargas eléctricas en EDM son en un número de miles por segundo, se puede observar en la imagen de electrodos dispersos la morfología de la superficie del electrodo de cobre desgastado. Dichas implosiones dejan cráteres de forma irregular sobre la superficie tanto del material como de la herramienta de trabajo. Este fenómeno mencionado se puede apreciar en la **Figura 5**, donde la superficie tiene su defecto morfológico.

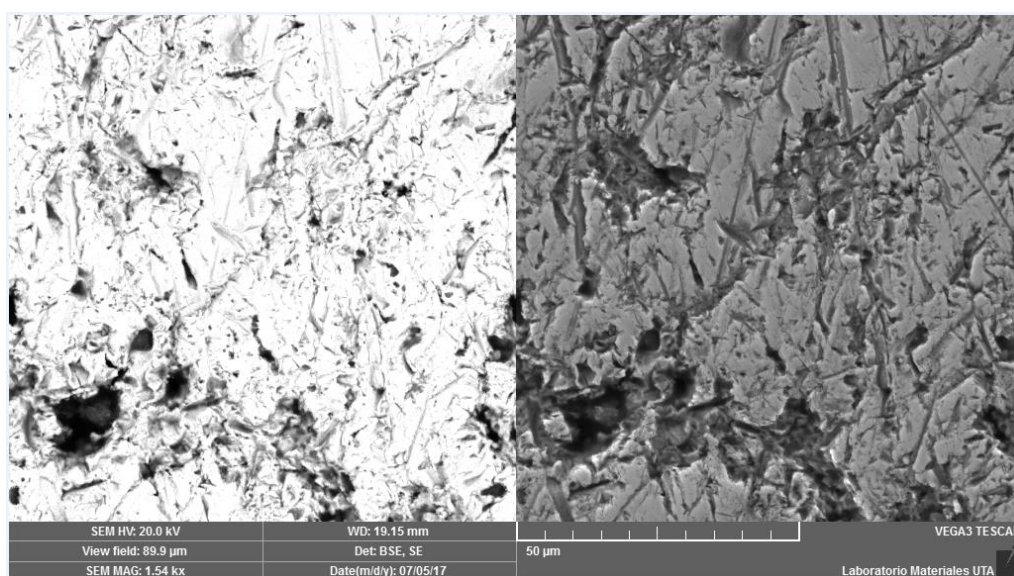


Figura 5. Topografía de desgaste de la herramienta de trabajo Cobre, imagen SEM BSE y SE

Un efecto especial evidenciado en los bordes de la herramienta es que los daños por las microdescargas del proceso no afectan en gran medida en los bordes de la herramienta de cobre. En la *Figura 6* se muestra una sección del borde de la herramienta, donde se puede apreciar que a medida que se aproxima al borde de la herramienta, la afectación superficial de las descargas sobre la topografía superficial del material es menor.

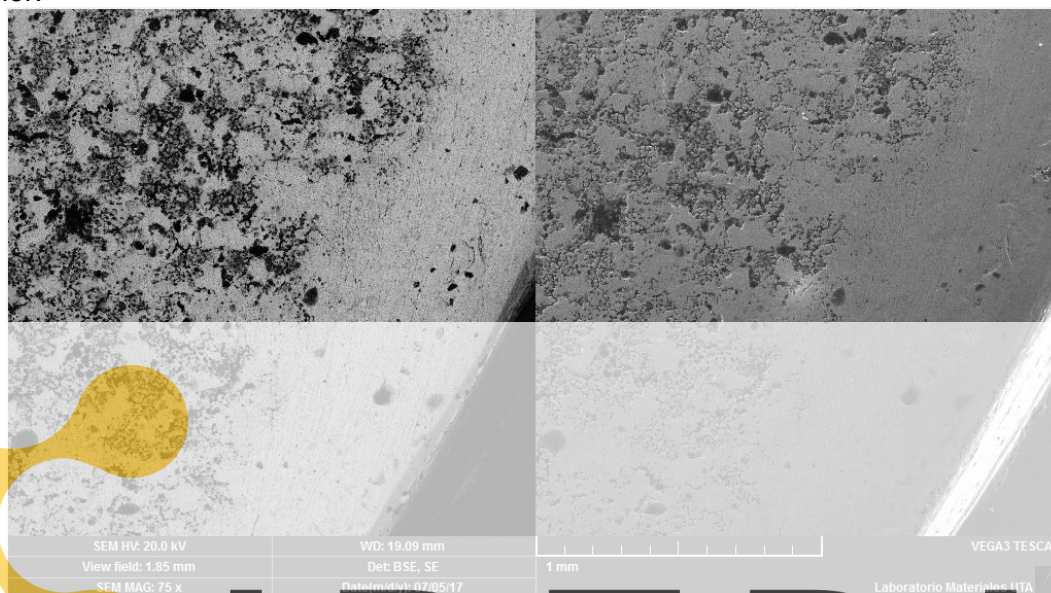


Figura 6. Topografía de desgaste en el borde de la herramienta, imagen SEM BSE y SE

La *Figura 7* muestra el efecto combinado de los parámetros de entrada sobre la topografía superficial de la microfundición. En las imágenes se expone una uniformidad topográfica lograda por el electrodo de cobre redondo con amperaje de 5, un pulso de 6 y a una profundidad de 5 mm. La alta energía de descarga resulta en la fusión y evaporación del material de trabajo que causa la formación de burbujas de gas que se expanden al salir de la zona de trabajo. La explosión de burbujas produce la generación de energía a alta presión que crea cráteres de tamaño en la superficie de trabajo. El diámetro y la profundidad del cráter aumentan a medida que aumenta la corriente de descarga y el tiempo de activación del pulso, lo cual incide en el aumento de la rugosidad superficial. Estos hallazgos concuerdan con estudios similares con diferente material reportados por (Castillo, I. H., López, O. S., Romero, G. A. L., & Roldán, C. H. C., 2018; Klocke, Schwade, Klink, & Veselovac, 2013), donde muestra que los niveles de corriente de pulso y tiempo de pulso influyen significativamente en la rugosidad media obtenida (R_a); es decir, son directamente proporcionales.

El tamaño de los cráteres de electroerosión en las condiciones indicadas se encuentra en un promedio de 60 μm como se evidencia en la imagen a 200 μm (*Figura 7, izquierda*). La alta energía de descarga da como resultado la formación de cráteres superpuestos y profundos con diámetros de gran tamaño, esto da lugar a una alta densidad de glóbulos de material derretidos. En la imagen a 20 μm (*Figura 7, derecha*), muestra una sección limpia sin glóbulos de material derretido por el bajo nivel energético empleado en la electroerosión. Esto se debe al uso del dieléctrico diésel para el proceso y a la estabilidad lograda dentro de los parámetros experimentales.

4. Conclusiones y recomendaciones

Los factores de entrada: material y geometría de la herramienta, son los factores que influyen en menor grado sobre el acabado superficial de la microfundición de

aluminio. Además, el pulso y la profundidad de corte influyen notablemente sobre el desgaste de la herramienta.

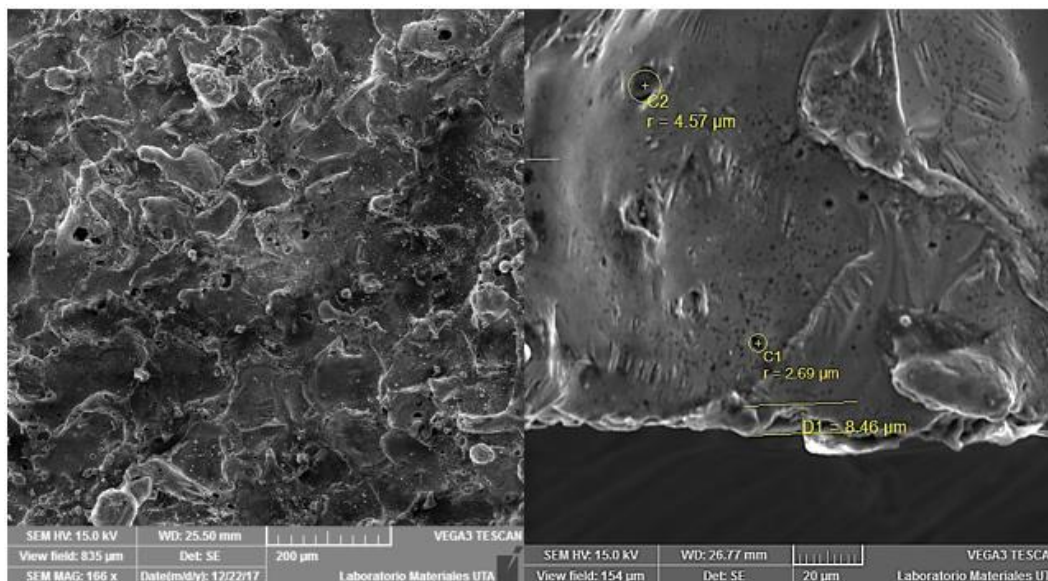


Figura 7. Topografía de la superficie de microfundición de aluminio electroerosionada a 200μ y 20μ respectivamente

Es poco probable que tenga una superficie lisa cuando se mecaniza por técnica EDM porque “sus cortadores” son la serie de chispas de alta energía de corta duración. Esto no se puede controlar para proporcionar una superficie lisa y acabada idealmente, pero sí se puede obtener una calidad aceptable para la mayoría de requerimientos industriales.

Mediante el uso del análisis de varianza (ANOVA), se encontró que un aumento de la energía de descarga resulta en un alto valor de (MRR), pero afecta negativamente a la (Ra). El tiempo de pulso es el factor que más influye en la tasa de remoción de material (MRR) con el 23.42% del porcentaje de contribución, mientras que para la rugosidad (Ra) el mayor porcentaje de contribución lo encontramos para el tiempo de ensayo con 28.61%.

Con el electrodo de cobre se obtiene mejor MRR, pero con el electrodo de grafito la rugosidad es mejor, de igual forma la geometría cuadrada es más eficiente que la geometría circular para MRR, mientras que para Ra es lo inverso. Con un pulso de 3 s y tiempo de ensayo de 5 min tanto MRR como Ra mejoraron.

Se recomienda utilizar un bajo amperaje al trabajar con dieléctrico diésel, ya que mejora el acabado superficial y disminuye notablemente los restos de material derretidos. El uso de dieléctrico diésel se justifica por su buen funcionamiento y su bajo costo local.

Bibliografía

- Ali, M. M., Laily, S., Manshoor, B., Syahrian, N., Izamshah, R., Hadzley, M., & Muhamad, M. (2015). Performance of copper, copper tungsten, graphite and brass electrode on MRR, EWR and SR of aluminium LM6 in EDM die sinking. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 6(1), 30-36.
- Amorim, F. L., Weingaertner, W. L., & Bassani, I. A. (2010). Aspects on the optimization of die-sinking EDM of tungsten carbide-cobalt. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 32(SPE), 496-502.
- Banker, K., Prajapati, U., Prajapati, J., & Modi, P. (2014). Parameter optimization of electro discharge machine of AISI 304 steel by using taguchi method. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 3(8), 20-24.

- Castillo, I. H., López, O. S., Romero, G. A. L., & Roldán, C. H. C. (2018). An experimental study of surface roughness in electrical discharge machining of AISI 304 stainless steel. *Ingeniería e Investigación*, 38(2), 90-96.
- Cuenca, V., Paredes, R., & Córdor, J. (2016). Diseño experimental de una solución polimérica para mejorar la relación de movilidad de los fluidos en un yacimiento previo a la implementación de un proyecto piloto de recuperación mejorada de petróleo. *Enfoque UTE*, 7(4), 127-139.
- Klocke, F., Schwade, M., Klink, A., & Veselovac, D. (2013). Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM roughing strategies using different graphite grades. *Procedia CIRP*, 6, 163-167.
- Kumar, N., Kumar, L., Tewatia, H., & Yadav, R. (2012). Comparative study for MRR on die-sinking EDM using electrode of copper & graphite. *International journal of advanced technology & engineering research*, 2(2), 170-174.
- Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K., & Schumacher, B. (2005). Advancing EDM through fundamental insight into the process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54(2), 64-87.
- Lee, L., Lim, L., Narayanan, V., & Venkatesh, V. (1988). Quantification of surface damage of tool steels after EDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 28(4), 359-372.
- Lin, C., Lin, J., & Ko, T. (2002). Optimisation of the EDM process based on the orthogonal array with fuzzy logic and grey relational analysis method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(4), 271-277.
- Marafona, J., & Wykes, C. (2000). A new method of optimising material removal rate using EDM with copper-tungsten electrodes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(2), 153-164.
- Mitra, A. C., Jawarkar, M., Soni, T., & Kiranchand, G. R. (2016). Implementation of Taguchi Method for Robust Suspension Design. *Procedia Engineering*, 144, 77-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.05.009>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*: John wiley & sons.
- Muthuramalingam, T., & Mohan, B. (2013). Influence of tool electrode properties on machinability in spark erosion machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(8), 939-943.
- Muthuramalingam, T., & Mohan, B. (2015). A review on influence of electrical process parameters in EDM process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(1), 87-94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.02.009>
- Pandey, P., & Jilani, S. (1987). Electrical machining characteristics of cemented carbides. *Wear*, 116(1), 77-88.
- Roy, T., & Dutta, R. (2014). Study of the Effect of EDM Parameters based on Tool Overcut using Stainless Steel (SS 304 Grade). *Int. J. Eng. Trends Technol (IJETT)*, 13(5), 196-199.
- Sanghani, C., & Acharya, G. (2014). A review of research on improvement and optimization of performance measures for electrical discharge machining. *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(1), 433-450.
- Santamaría Zambrano, C. J. (2017). *Análisis de parámetros de mecanizado en el proceso de electroerosión por penetración en microfundición de aluminio con electrodos de cobre y grafito y su relación con la rugosidad superficial resultante*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Mecánica.
- Shrivastava, S. M., & Sarathe, A. (2014). Influence of process parameters and electrode shape configuration on material removal rate, surface roughness and electrode wear in die sinking EDM: a review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(4), 138-145.

- Singh, B., Kasdekar, D. K., & Parashar, V. (2015). Application of GRA for Optimal Machining Parameter Selection in EDM. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 8(10), 371-382.
- Sohani, M., Gaitonde, V., Siddeswarappa, B., & Deshpande, A. (2009). Investigations into the effect of tool shapes with size factor consideration in sink electrical discharge machining (EDM) process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(11-12), 1131.
- Srinivasa, R. P., & Eshwara, P. K. (2018). Electro-Discharge Machining of Aluminum Alloy with Nickel Powder-Mixed Dielectric. *Journal of Applied and Advanced Research*, 3(2), 49-51. doi: 10.21839/jaar.2018.v3i2.153
- Su, J., Kao, J., & Tarng, Y. (2004). Optimisation of the electrical discharge machining process using a GA-based neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(1-2), 81-90.
- Tiwari, A. (2017). Effect of EDM parameters in obtaining MMR and EWR by matching stainless steel using copper as an electrode. *International Journal for Technological Research in Engineering*, 4(11), 2304-2306.
- Wu, J., Zhou, M., Xu, X., Yang, J., Zeng, X., & Xu, D. (2016). Fast and stable electrical discharge machining (EDM). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 72, 420-431.
- Yahya, A., & Manning, C. (2004). Determination of material removal rate of an electro-discharge machine using dimensional analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(10), 1467.